

報告書概要

①技術研究開発テーマ名	類型化に基づく地震による斜面変動発生危険箇所評価手法の開発
②研究代表者	
氏名	所属・役職
檜垣 大助	弘前大学 農学生命科学部 教授
③共同研究者	
氏名	所属・役職
今泉 文寿	静岡大学 農学部 准教授
井良沢道也	岩手大学 農学部 教授
梅村 順	日本大学 工学部 専任講師
川邊 洋	新潟大学 農学部 教授
佐藤 剛	帝京平成大学 現代ライフ学部 准教授
石井 靖雄	土木研究所 土砂管理研究グループ 上席研究員
千葉 則行	東北工業大学 工学部 教授
綱木 亮介	(一財)砂防地すべり技術センター 斜面保全部長
八木 浩司	山形大学 地域教育文化学部 教授
若井 明彦	群馬大学大学院 工学研究科 教授
④背景・課題	
<p>最近 10 年間をとっても、平成 16 年中越地震、平成 20 年岩手・宮城内陸地震さらに平成 23 年東北地方太平洋沖地震などで、中山間地や都市近郊の丘陵地において崩壊・地すべりなどの斜面変動による災害が頻発し、甚大な生命・財産被害を生じさせている。さらに、これらは、河道閉塞を生じさせ治水砂防上の大きな脅威となるだけでなく、ライフラインをストップさせ、地震発生後の災害対応にも大きな支障を生じさせる。</p> <p>東海・東南海・南海地震さらには活断層沿いの直下型地震での巨大災害が懸念される中で、災害予防・地震発生後の迅速な対応による減災を図るために、地震による災害危険性の高い斜面を把握することは喫緊の課題である。ところが、これまで斜面変動による災害への対策や危険斜面の抽出は、豪雨・融雪に起因するものを主な対象としてきた。</p> <p>平成 7 年の兵庫県南部地震以降、地震予測及び過去の地震による土砂災害発生実態に関する研究が急速に進み、想定される地震ケースに対する地震強さの予測や液状化などの地盤災害予測が進んできている。一方、(社)日本地すべり学会では、地震による地すべり災害軽減を目的として平成 21～23 年度の 3 年間で地震地すべり特別研究プロジェクト（以下、地震地すべりプロジェクト）を実施し、国内外の過去の地震による斜面災害の実態や発生機構を把握してきた。</p> <p>以上のような社会・行政・科学的背景から、今、地震防災対策推進のため、想定される地震による斜面変動発生危険箇所評価法を構築することが必要である。</p>	

⑤技術研究開発の目的

本研究では、さまざまな地形・地質・水文条件の地域に強震動を生じさせた東北地方太平洋沖地震での斜面変動発生事例と、地震地すべりプロジェクトで収集された過去の地震による斜面変動事例を用いて、想定地震での影響地域で地震動要因・地形/地質/土質等要因の組み合わせ評価により地震による斜面変動発生危険箇所を評価する方法の開発を行うことを目的とする。

⑥技術研究開発の内容・成果

本研究では、図-1 に示すように、⑤で記した事例から運動タイプ別に発生場要因を整理し解析を行って、階層構造分析法（AHP 法）を用いて地震による斜面変動発生危険地域を抽出する手法を提案した。また、その評価の結果、危険性が高いとされた地域でより詳細に危険箇所を把握するための調査手法および視点を提案した。さらに、これらから、実務者向けの危険地域調査要領案を提示した。

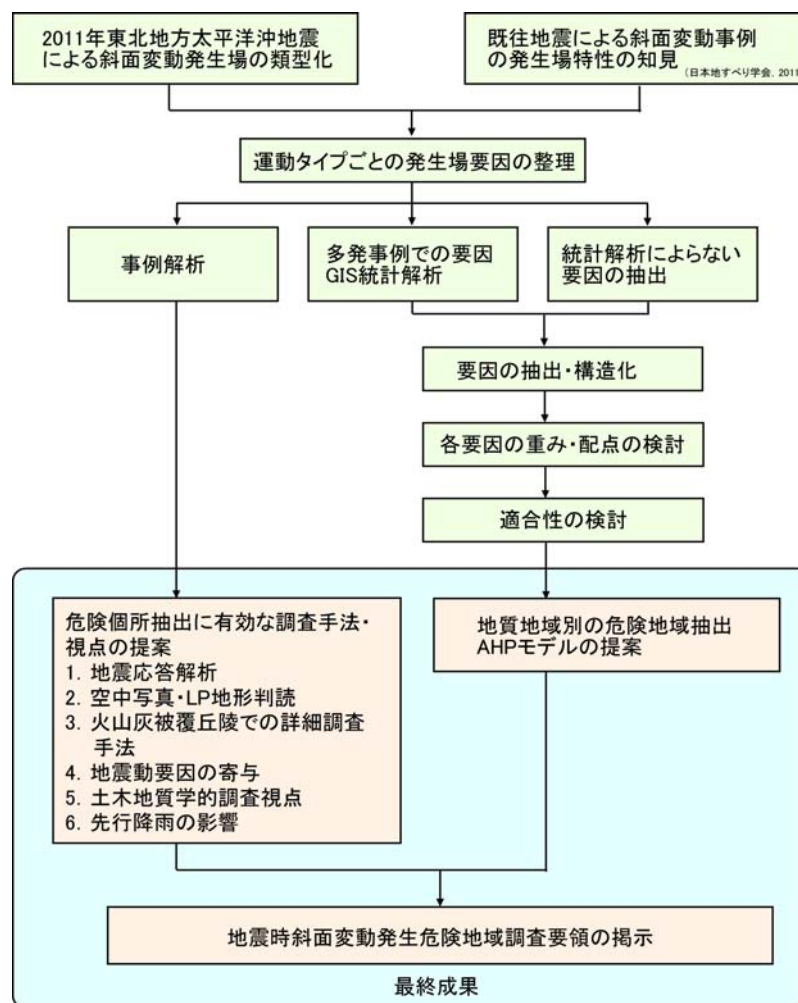


図1 本研究の流れ

⑥-1 平成23年度の内容・成果

2011年東北地方太平洋沖地震とその余震・誘発地震による崩壊・地すべり等の斜面変動発生場所・運動タイプについて、陸域観測衛星「だいち」AVNIR-2, PRISM 画像によって一部予備的把握を行い、さらに、岩手県から長野県にかけての各地域の砂防・治山関係の国・県機関による緊急点検結果の収集と、その確認も含めた本課題研究実施メンバーによる現地調査によって把握した。得られた結果を、斜面変動タイプとして、地すべり・崩壊・土石流・変状（亀裂やはらみ出しなど変動範囲を特定しにくい現象の生じた斜面）・盛土の変状に分けて GIS データベースとして整理し分布図を作成した（図-2）。



図2 2011年東北地方太平洋沖地震と誘発地震による斜面変動の分布

斜面変動は、岩手県北部から奥羽山脈より東側で主に発生しており、栃木・茨城・群馬の各県でも発生が多く、さらに、2011年3月12日発生 of 長野県北部地震による新潟県～長野県北部での発生も併せ、面積約0.01ha以上のもので768箇所が確認された。本震により発生したとみられる斜面変動の分布と本震の計測震度分布図を重ねあわせた解析の結果、斜面変動はほとんど震度5強以上で発生していた。地質的には、第三系と先第三系の堆積岩や変成岩など層理・節理・片理など工学的に特定な方向に弱い面を持つ岩盤で発生が多かった。

比較的発生の多かった地域での斜面変動の特徴は以下のように整理できる。

1) 新第三系堆積岩からなる宮城県松島湾周辺地域の丘陵地・島嶼部では、76箇所（発生密度1.27箇所/km²）の崩壊が発生した。いずれも規模は1ha以下と小さく、多くが節理・層理の発達した凝灰質砂岩・シルト岩からなる縄文海進以降の海岸浸食でできた直線斜面で発生していた。降雨での崩壊と異なり、谷型斜面での発生は稀であった。

2) 震源に近くほとんど震度5強以上の範囲とみられる三陸海岸南部～牡鹿半島でも、中世代の砂岩・粘板岩互層からなる過去の河岸侵食や海岸浸食でできた傾斜40°以上の斜面で主に崩壊が発生した。しかし、分布密度は0.17箇所/km²と松島湾地区の1/7であった。震源の近い北上山地の先第三系の地質地域で斜面変動発生数が少なかったのは、硬質で弱面が少ない地質からなるためと考えられる。

3) 福島県南部～栃木県北部の火山灰質ローム層の被覆する丘陵地では、移動距離の大きい地すべり（崩壊性地すべり）が多く発生した。福島県南部では、地すべり移動方向がこの地域の主要な揺れの方向と一致することから、尾根部で地震動が増幅する地形効果と、長期間顕著な侵食を受けなかった緩やかな尾根部には火山灰層が累重して残っていたことと、その中に埋没土や粗粒火山灰層の下の細粒火山灰層など風化の進んだ弱層が面的に存在していたことで、そこにすべり面ができたと考えられる。この層は高い鋭敏比を持ち繰り返し軟化を受けやすかったため、移動距離も大きくなった。また、白河市葉ノ木平地すべりのように、揺れの時間が長かったため、尾根部に発生した地すべり地塊が火山灰層の形成する埋没谷地形の上で載り、古い谷を埋没させていた火山灰層の地塊がさらに移動し移動距離が大きくなった事例もある。

4) 福島県いわき市周辺では、先第三系や新第三系の堆積岩からなる山地・丘陵地で、本震だけでな

く 2011 年 4 月 11 日発生の内陸直下型地震 (M=7.0) で、震源断層から水平距離 10km 以内の範囲で崩壊・地すべりを生じた。また、同地震・本震とも尾根斜面で岩盤すべりが発生した。これらの斜面変動は、正断層として生じた地震断層の上盤側で多く発生した。

5) 長野県北部地震 (M=6.7) では、新第三系堆積岩主体の山地で、震源断層から水平距離 10km 以内で地すべりが多く発生した。地震発生時には融雪はまだ進んでいなかったために、積雪による有効応力の増加が、同じような規模の地震で類似の地質の分布地域で起こった 2004 年新潟県南部 (中越) 地震に比べ、崩壊・地すべり発生数が少なかった原因として考えられた。

内陸直下型の 2008 年岩手・宮城内陸地震 (M=7.2) で 3,200km² の範囲に 4,100 箇所もの斜面変動が発生したのに比べ、東北地方太平洋沖地震での発生数はかなり少ない。両者で強震動の発生した栗駒山周辺地域での地震動の大きさを見ると、前者では短周期で非常に大きな加速度が旧カルデラを埋めた軟弱な軽石凝灰岩やその上に載る硬質だが脆い溶結凝灰岩などの火砕流堆積物があったところに加速度・速度とも後者の数倍の揺れが発生したことが大規模な地すべり・崩壊性地すべりや崩壊を多発させたことと見られる。また、両者とも融雪は少なく先行降雨も少ない時に発生したので、ともに地下水位は低い条件にあった。

東日本大震災における斜面変動発生にかかわる地形・地質・地震動の要因から斜面変動の特徴は以下のように類型化できる。

- a) 地震動の強さでは、震度 5 強以上で斜面変動が発生し、震度 6 弱以上で発生が急増する。この事実は過去の日本の地震で、震度 5 以上で斜面変動が多発するという林・阿部(2011)の結果と整合する。
- b) 岩盤に弱面が密に存在したり流れ盤構造の斜面など力学的な弱面がある場合、今回のような強い揺れが繰り返す震動で破壊・変位が進み崩壊・岩盤すべりが発生しやすい。このため、新第三系軟岩や先第三系の堆積岩・変成岩で斜面変動が多発したとみられる。
- c) 火山灰質ローム層の被覆する丘陵地では、粗粒・細粒の累重する堆積構造で弱層となりやすい細粒層にすべり面が掲載されやすく、移動距離の大きい崩壊性地すべりが多発する。

以上の斜面変動発生場の類型は、1/20 万スケールの危険地域判定の要因となりうる。また、震度分布の予測精度や発生場の要因分析スケールから、要因類型化による評価は、まず 1/10~20 万地図程度の危険地域ゾーニングを行い、その後、危険性の高い地域で 1/2.5 万程度の危険個所評価を行うのが妥当と考えられた。

⑥-2 平成 24 年度の内容・成果

これまでに収集された 1964 年新潟地震以降 2011 年東北地方太平洋沖地震まで 24 の地震事例について、発生した斜面変動の文献資料調査を行った結果、斜面変動は、震度 5 以上で発生し、崩壊は傾斜や凸型の斜面形など地形に強く依存し、地すべりは地質・地質構造に依存していることが明らかになった。また、斜面末端の侵食に関わる要因は、地すべり・崩壊ともに発生に関わっていることが示唆された。地すべりのうちで、火山灰累層中の弱層が地震動により強度低下を生じ、移動距離が大きくなる崩壊性地すべりが幾つかの地震で認められた。

以上の結果にもとづき、斜面変動発生事例の多い 2008 年岩手・宮城内陸地震、2004 年新潟県中部地震、1984 年長野県西部地震、1974 年伊豆大島近海地震、1970 年伊豆半島沖地震、1968 年十勝沖地震を対象に、GIS データからの統計解析により地形・地質要因の分析を行った。具体的には、地形要因として国土地理院 10m メッシュ DEM データから求められる地形量を、地質要因として、全国 1/20 万シームレス地質図に基づく岩相区分及び地すべり地形分布図データベース((独)防災科学技術研究所)のデータを用いた。そして、地域の地形・地質を反映した斜面変動の要因の指標となる入力データを作成した。入力データから AHP 得点を算出するには、一定の検索半径 R の中に含まれる 10m メッシュデータから、斜面傾斜のような連続変量ではその平均値、地質や谷次数などの個別変量では最頻値や最大値を算出し、それをもとに AHP 得点を算出した。このような方法をバッファ移動分析と呼ぶ。ここで、地震動要因については、地域によって地震動予測精度に差があることなどから評価指標としては用いていない。

分析の結果、崩壊については、斜面の傾斜や起伏量、地上開度といった地形要因と地震による崩壊発生面積率との間に相関がみられた。地すべりについては、地形要因としての地上開度に加え、地質区分、地質構造、旧地すべり堆積物 (地すべり地形) の分布、斜面の集水面積 (谷次数) といった地質や地下水に関連する指標と相関性が認められた (図-3)。

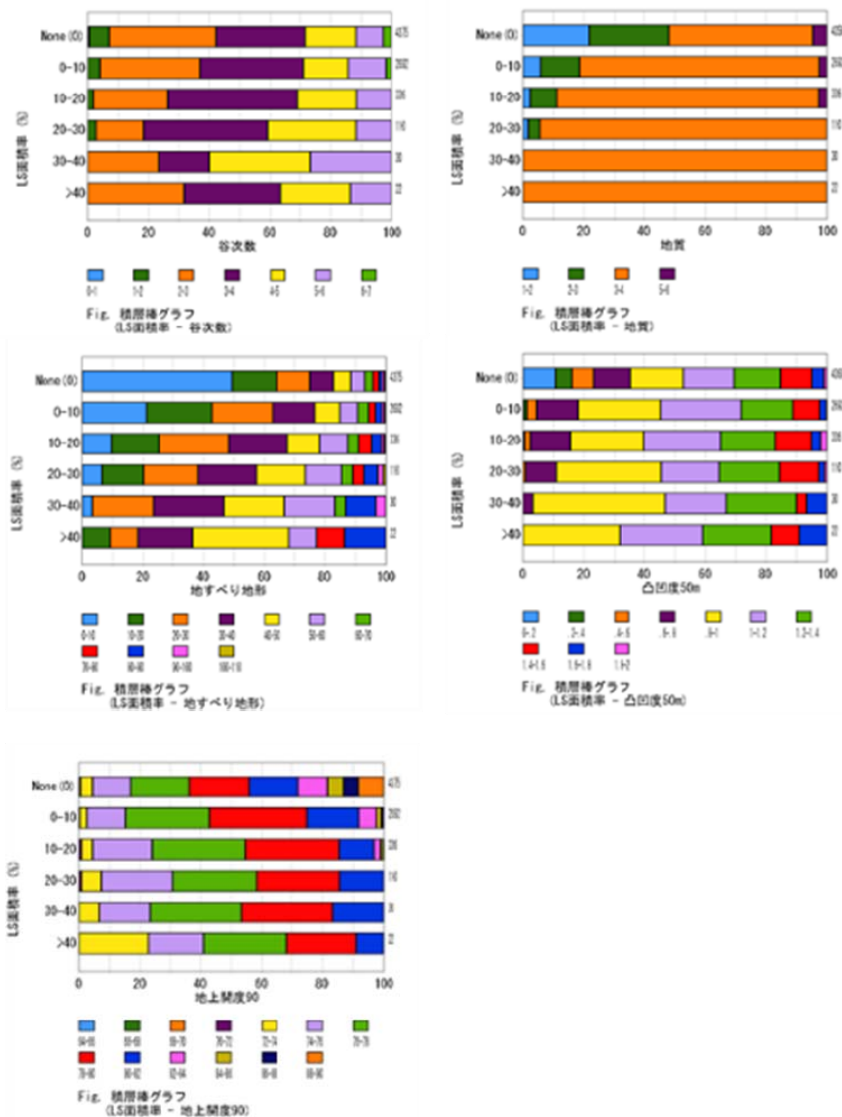


図-3 積層棒グラフを用いた各要因におけるウェイトの検討
(地すべり発生面積率ごとの各要因のランク別の占有割合から検討) (中越地震—地すべりの例)

一方、斜面変動発生にかかる地震動要因として、2011年東北地方太平洋沖地震と2008年岩手・宮城内陸地震の観測データから、海溝型地震と内陸直下型地震の特徴を比較した結果、地震動の振幅の大きさや地中での卓越周期の違いは、直下型と海溝型による違いよりも、震源までの距離の影響を反映していると推察された。また、地表での地震動卓越周期や地中に対する地表での揺れの増幅度の違いは、表層地盤の固有周期の違いや地盤応答の線形性を持たないことによると解釈された。斜面に働く地震動の影響の評価として、2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震力が直接影響して発生する斜面変動について、最大加速度ベクトル（斜面傾斜方向と法線方向）および Arias Intensity を用いて評価することを試みた。その結果、とくに前者の大きい個所で地すべりが多発していた。さらに、東北地方太平洋沖地震・岩手宮城内陸地震・中越地震で、先行降雨が地震時の斜面変動発生にどう影響するか検討した結果、火山灰層での崩壊性地すべり集中発生や流動性すべりの発生などで降雨の影響により斜面変動が多発していることが分かった。

危険地域把握のための要因評価手法の開発では、文献に記載された知見や過去の危険箇所点検の調査表に挙げられた項目、斜面変動多発事例での GIS 統計解析結果などをもとにしたブレインストーミングを行った。その結果から、崩壊・地すべりそれぞれについて、前述の抽出された評価要因を用いて AHP 階層構造化を行い、一対比較によるウェイト設定を行った。そして、AIC (赤池の情報規準)

や、斜面変動発生・非発生データの AHP 得点分布がどの程度分離しているかを示す指標を用いて、ウェイトを変えながら試行計算を繰り返し、崩壊・地すべり発生箇所付近の AHP 得点を算出した。その過程で重み付け自体も当初の値よりも的確な値へと修正された。その結果得られた各要因の配点による AHP モデルを、2004 年中越地震に適用した結果、崩壊はほぼ得点の高い所 (100 満点中 60 点以上) で発生していることが示され、地すべりも 70 点以上で発生していることが分かった。このように、AHP 法を用いた危険地域の抽出が妥当であることが示されたが、一方で発生・非発生の分離性をさらに高める課題が残された。

火山灰被覆丘陵地での崩壊性地すべりでは、火山灰層の堆積状況や丘陵地斜面の形成史などで前述の地質地域での地形・地質要因とは異なることが分かり、地形分類を基礎とした危険地域判定が有効となる可能性がある。

地盤解析による火山灰被覆丘陵での再現性検証では、東北地方太平洋沖地震での白河市葉ノ木平地すべりで、動的弾塑性有限要素法に基づく斜面変位の数値シミュレーションにより、地震動による繰返し載荷が斜面内の土のせん断強度を急速に低下させ、斜面を不安定化させるメカニズムで説明できた。一方、より広域的な領域の解析のため、栃木県の一部地域を対象とし、Kik・Net 観測記録から地域全体の地震応答特性等を上記方法により調べた。その結果、大きなせん断応力の発生する斜面に実際の地すべりも生じている傾向が見られた。このような地形・地質的条件を考慮した地すべり危険度の広域的な評価手法は、より大縮尺な危険箇所評価にもつながる手法である。

以上の成果から、一般的に入手可能な地形・地質データを用いた AHP 法にもとづく崩壊・地すべりの発生危険地域予測を示す評価手法マニュアル案の骨子を提示するとともに、本手法で実際に危険地域評価の妥当性を検証するモデル地域として、地質分布や想定地震動の大きさなどを考慮して静岡県東部 (伊豆半島)・中部 (安倍川上流域)、四国山地南部などを選定した。

⑥-3 平成 25 年度の内容・成果

過去の地震事例から明らかになった斜面変動の発生しやすい地形・地質的要因及び地震動の特徴を整理すると、図-4 に示すような地質地域ごとに発生しやすい現象が整理される。この中で、古第三系以前の地質分布地域については、過去の斜面変動発生事例を示すデータが少ないため、歴史地震での発生が知られている静岡県安倍川上流域から山梨県早川上流域を対象に、統計解析によらず既往知見と専門家のブレインストーミングによって発生場要因の抽出と構造化、各要因の配点の付与を行った。

危険箇所評価を、1/5 万～1/10 万スケールでの「広域評価」(ゾーニング)と 1/5 万より大きなスケールで個別に危険斜面を抽出する「危険箇所評価」に分けた。ここでは、実用的にまず必要となる「広域評価」に重点を置いて、上に述べた地質地域ごとに、起こりやすく激甚な災害にも結びつきやすい現象とその地形・地質要因の類型化にもとづき、それぞれについて AHP 法による危険地域評価手法を提案した。具体的には、(a)新第三系以降地域での地すべり・崩壊、(b) (a)の中で未固結降下火砕物に起こる現象を分離し、火山灰被覆丘陵地域での斜面変動、(c) 古第三系以前の地質地域では、崩壊性地すべりを対象とした。また、これらの現象では、ある程度以上規模が小さいものは対象にならない。それは分析対象となったデータの把握限界があるためで、空中写真判読によるデータでは判読の限界から予測現象の規模 $10^2 \sim 10^3 \text{m}^2$ 以上、歴史資料とその写真判読にもとづいた古第三系以前の地域の崩壊性地すべりでは 10^5m^2 以上となる。

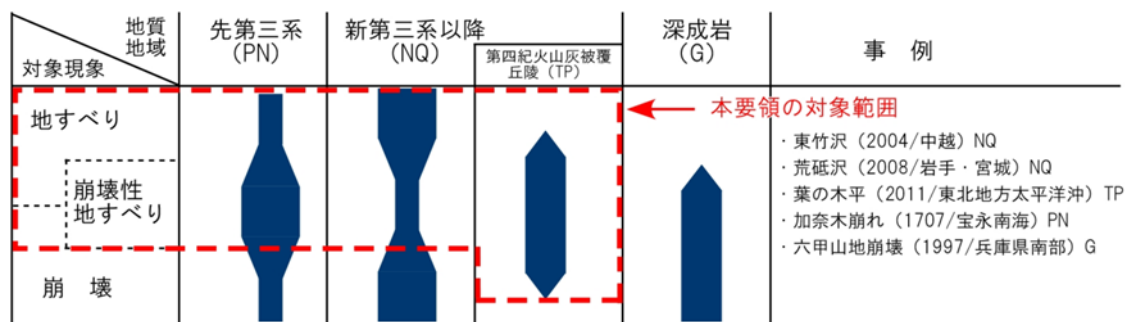


図-4 地震により起こりやすい斜面変動タイプと地質地域

新第三系以降の地域では、24年度に開発したGISを用いた主に統計解析に基づく評価モデルについて、AHP得点分布を近似した正規確率密度関数を用いた過誤分析を行って、要因とその重みづけ、配点を検討し、評価手法の適合性を高めた(図-5)。地すべりの危険度評価には「地質(岩相)」、「地すべり土塊」、「凸凹度」、「地上開度」、「谷次数」が、崩壊の危険度評価には「勾配」、「凸凹度」、「地上開度」、「地質(岩相)」、「谷次数」が要因としてそれぞれ用いられた。新潟県中越地震で地すべりが多発した芋川周辺地域のAHP得点分布を図-6に示すが、地すべりは70点以上の高得点域に多発している。

Item	地質(岩相)	地すべり土塊	凸凹度50m	地上開度	谷次数	
Weight	30	10	15	25	20	
	非発生		発生			確率合計
$\mu 1$	$\sigma 1$	p1	$\mu 2$	$\sigma 2$	p2	p1+p2
43.4	17.9	0.339	58.2	24.0	0.379	0.717

μ : 平均値 σ : 偏差値 p: 確率

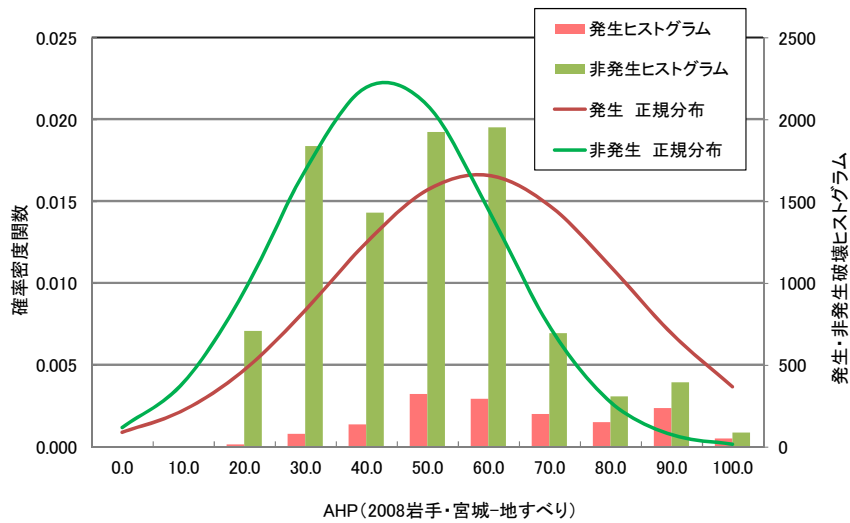


図-5 地すべりの最適 AHP モデル (岩手・宮城内陸地震) での発生・非発生別 AHP 得点のヒストグラムと正規分布曲線

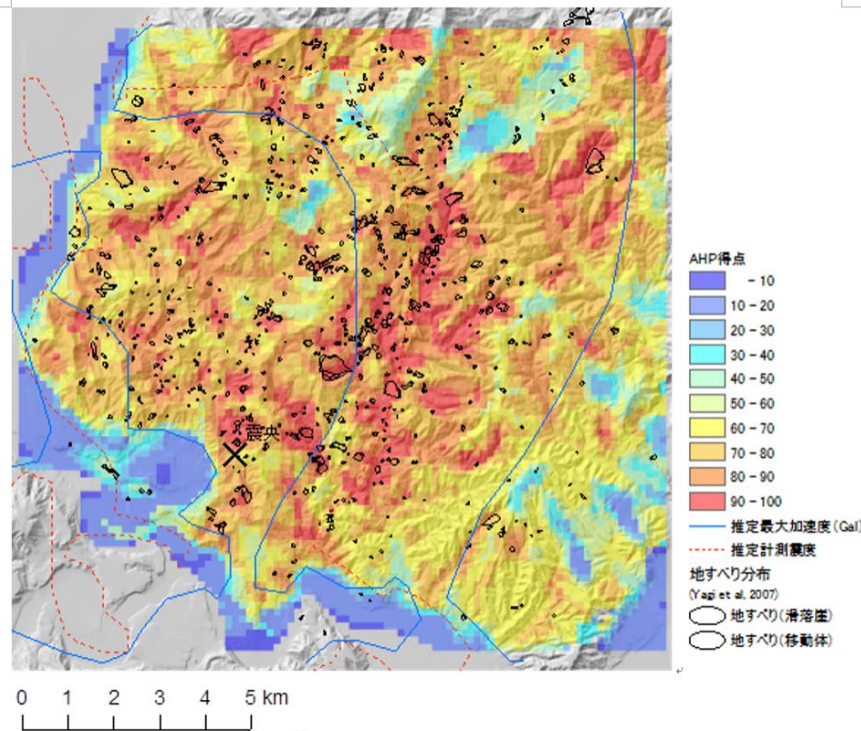


図-6 2004年新潟県中越地震 地すべり AHP モデルによる危険度評価マップ

新第三系以降の地質の中で、2011年東北地方太平洋沖地震、1983年長野県西部地震、1978年伊豆大島近海沖地震と1968年十勝沖地震で多発した「火山灰被覆丘陵地で斜面変動」について、発生場の地形・すべり面位置と性状等からタイプを分けた(図-7)。それに基づき、地震だけでなく降雨の影響も受けた可能性があるものの約240箇所の発生箇所を特定した1968年十勝沖地震による青森県八戸周辺地域での斜面変動についてGIS統計解析を行って、AHP評価モデルを構築した。そこでは、平均傾斜、地上開度、起伏量を要因とすることで、実際の発生箇所分布とよく整合した(図-8)。

		2011年 東北地方太平洋沖地震	1984年 長野県西部地震	1978年 伊豆大島近海地震	1968年 十勝沖地震	
発生地域	地域名	福島県白河市周辺	長野県王滝村 御岳高原地区	静岡県河津町 見高入谷地区	青森県八戸市周辺	
	震度	震度6強(白河)	推定震度6(王滝村)	推定震度5~6	震度5(八戸)	
	降雨	—	—	—	前日まで降雨 (3日間雨量約200mm)	
発生規模	面積	10 ³ ~10 ⁴ m ²	10 ³ m ²	10 ³ ~10 ⁴ m ²	10 ³ m ²	
	深さ	約10m	約10m	約5m	約2m	
発生斜面	凸型縦断形	頂部斜面 ~上部谷壁斜面 ~下部谷壁斜面	●	●		
		上部谷壁斜面 ~下部谷壁斜面	▲ (坂東)		●	●
		下部谷壁斜面Ⅰ ~下部谷壁斜面Ⅱ	▲ (岡の内)			
	直線形	下部谷壁斜面 (直線縦断形)				●
		上部谷壁斜面 (凹型縦断形)				▲
	凹型縦断形	谷頭凹地				●
		下部谷壁斜面 (凹型縦断形)				
すべり面	風化軽石層 (粘土化)	●	●		● (中筒)	
	風化火山灰土層 (粘土化)	●		●		
	軽石層				●	
	火山灰層 (砂質)				●	
	火山灰土層				●	
発生現象と 主要因	崩壊性地すべり	● 地震動の増幅(凸斜面) +弱層(粘土質)の存在	● 地震動の増幅(凸斜面) +弱層(粘土質)の存在	● 地震動の増幅(凸斜面) +弱層(粘土質)の存在	●(中筒) 地下水の集中(凹斜面) 弱層(粘土質)の存在	
	崩壊 (上部谷壁斜面)				● 地震動の増幅(凸斜面) +先行降雨	
	崩壊 (下部谷壁斜面)				● 急斜面 +先行降雨	
	崩壊 (谷頭凹地)				● 地下水の集中(凹斜面)	

図-7 火山灰被覆丘陵での斜面変動発生要因の整理

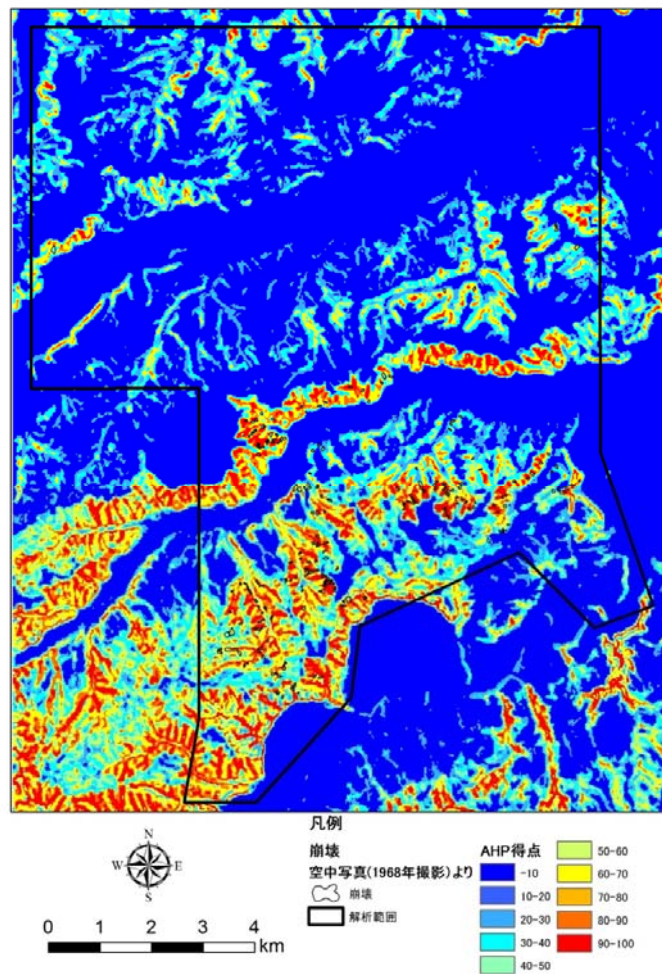


図-8 1968年十勝沖地震による斜面変動発生箇所と AHP 得点分布

次に、南海トラフ地震での土砂災害危険性が懸念されながら、過去の地震による斜面変動報告の少なかった古第三系以前の付加体からなる地質地域での崩壊性地すべり危険地域での AHP 評価モデルを提案した。すなわち、1707年宝永南海地震での安倍川上流大谷崩れで崩壊前兆地形とされている二重山稜・幅広い尾根地形を抽出する手法を検討した。DEM データから求められる指標「断面形状の凸度」を新たに導入、これに「起伏量」を加え崩壊性地すべりを対象とした AHP モデルを構築した。それを、安倍川上流・富士川右岸地域および高知県東部（宝永南海地震による高知県加奈木崩れとその周辺）のサンプル地域に適用した。その結果、空中写真判読等から判断される加奈木崩れの発生場となった斜面の背後に残存する山体の重力的不安定範囲が、AHP の高得点領域（70 点以上）として抽出された（図-9）。さらに 2008 年中国汶川地震の事例分析も対象に検証も試みた。

以上のような各地質地域での評価モデルに従った AHP 得点による危険地域評価結果で、どのような危険度区分ができるかについても検討した。各地域で、AHP 得点の大きい場所ほど斜面変動発生率が大きくなるので、一例として、ある AHP 得点以上で斜面変動発生率が急増するような値を境に危険度を 3 段階に区分する事例を示した。

以上の方法で「広域評価」を行い危険度が高い(AHP 得点が高い)と判断された地域や、保全対象等の面で重要と判断される地域では、「危険箇所抽出」を行うことを提案し、そのための調査・解析手法やその視点について事例を挙げて解説した。具体的には、危険箇所調査の手法として、(1) 空中写真判読とレーザプロファイラ地形図による地形判読、(2) 現地調査における土木地質的視点、次に数値解析による危険箇所把握手法として、(3) 地震応答解析、現地での危険箇所抽出のための、(4) 斜面微地形分類と空中電磁探査、さらに、地震力の影響のしかたについて、(5) 斜面変動に及ぼす地震動の影響評価手法の検討、斜面への地下水供給の影響について、(6) 地震前降雨、融雪等影響につい

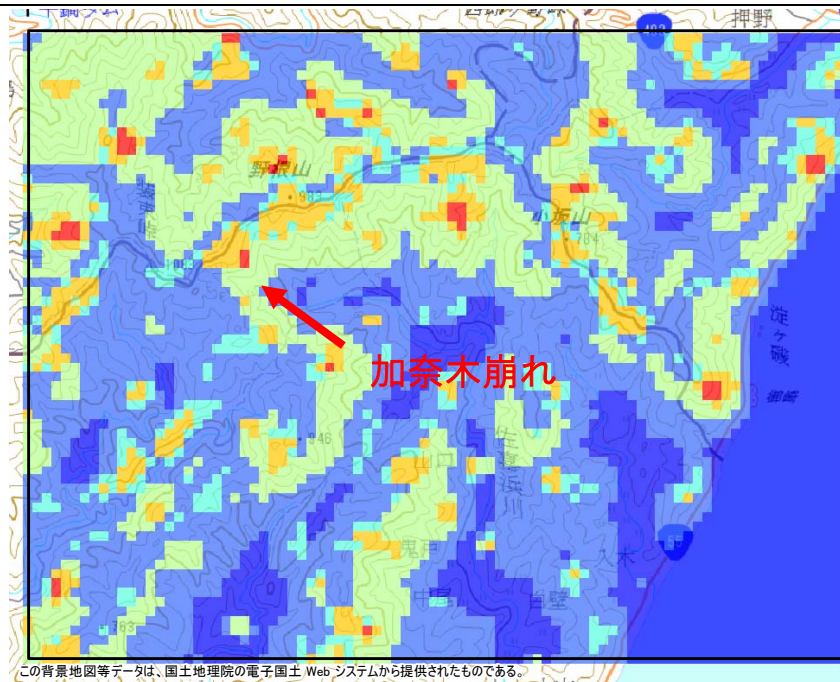


図-9 古第三系以前の地質地域での大規模崩壊性地すべりを対象とした
AHP 得点分布(高知県加奈木崩れ周辺)

て、を概説した。これらの手法・視点での調査・解析にもとづき危険斜面を抽出し、さらに調査ボーリング・地形地質踏査・斜面安定解析等の地すべり・崩壊などの精査へと進むことになる。

危険箇所抽出では、以下の内容について概説した。

(1) 空中写真判読とレーザプロファイラ地形図による地形判読

空中写真やレーザプロファイラ地形図の判読によって地形形成プロセスを把握し危険斜面抽出に繋げる手法について記載した。大規模崩壊性地すべり発生危険斜面の抽出のため、多重山稜が存在する斜面で、縦断方向に、山向き小崖をなす部分の総長さを斜面上端から下端までの長さで割った「山体歪度」をレーザ地形図から算出して危険度を評価する手法を提案した。

(2) 現地調査における土木地質的視点

2011年東北地方太平洋沖地震では、相対的に堅固な中・古生界の硬質岩分布地域でも、複雑な短波長での褶曲構造の発達により岩盤内に歪みが蓄積された結果層理・節理面間の固着が緩んだ地域で、40度以上の急傾斜面となった場所では、地震時の崩壊が発生した。ここでは、地震時の斜面変動を対象にこのような地域において注目すべき土木地質的な調査項目について述べた。

(3) 地震応答解析による危険斜面の抽出

評価対象地震動を設定できる場合に、対象地域の3次元地形・地質構造モデルを作成して動的弾塑性FEMによる地震応答解析を行って山地地盤での最大加速度応答や最大せん断応力の分布等を求め、崩壊や地すべり発生危険斜面を予測する手法を提案した。東北地方太平洋沖地震の関連地震として発生した福島県浜通りの地震(2011年4月11日発生, M=7.0)での予測結果(図-10)では、表層で最大加速度の大きい尾根斜面で崩壊が多く発生し、最大せん断応力の大きい谷壁斜面下部を末端とした地すべりが発生していた。斜面上部で加速度の大きな箇所が、斜面下部でせん断応力の大きな箇所の存在する箇所が多い、といった特徴から相対的に危険度の高い地域を抽出できる可能性がある。このようないわば広域評価の中での詳細評価から、特定の斜面での地質構造をモデル化して地すべり発生を予測する手法も示した。地震動による繰返し载荷で徐々に強度低下する層が生じることを考慮できるUWモデル(Wakai and Ugai, 2004)を用いて白河市葉ノ木平地すべりでの大きく移動した地すべり発生や中越地震の地すべり発生を模擬することができた。

(4) 火山灰被覆丘陵を対象とした崩壊性地すべり危険斜面の抽出手法

火山灰被覆丘陵では、斜面に沿って堆積した風化テフラ層や埋没土壌等がすべり面になって発生し長距離流動しやすい崩壊性地すべり発生が多い。危険斜面の抽出手法として、微地形分類と空中電磁探

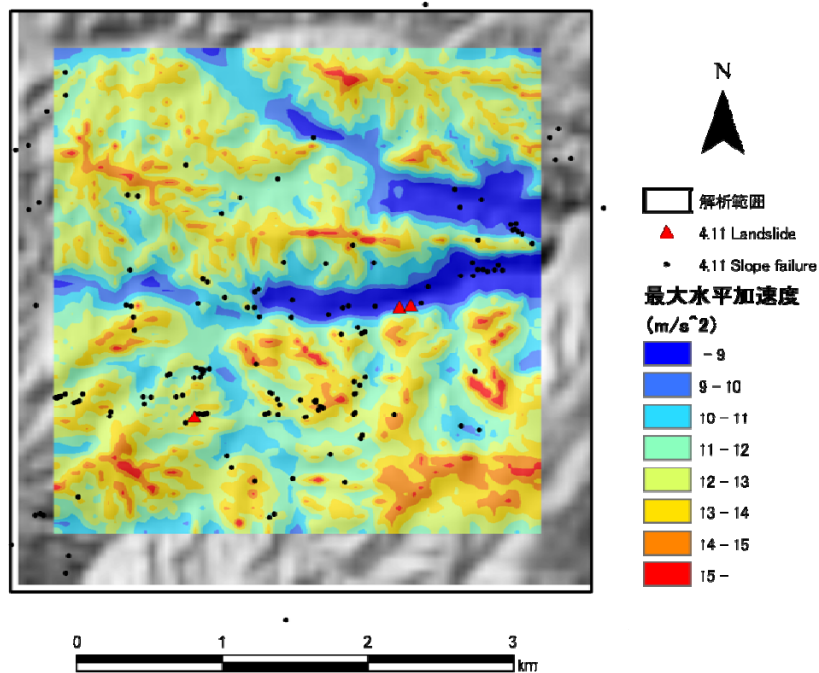


図-10(a) 地表面の最大加速度の分布（福島県いわき市南部）

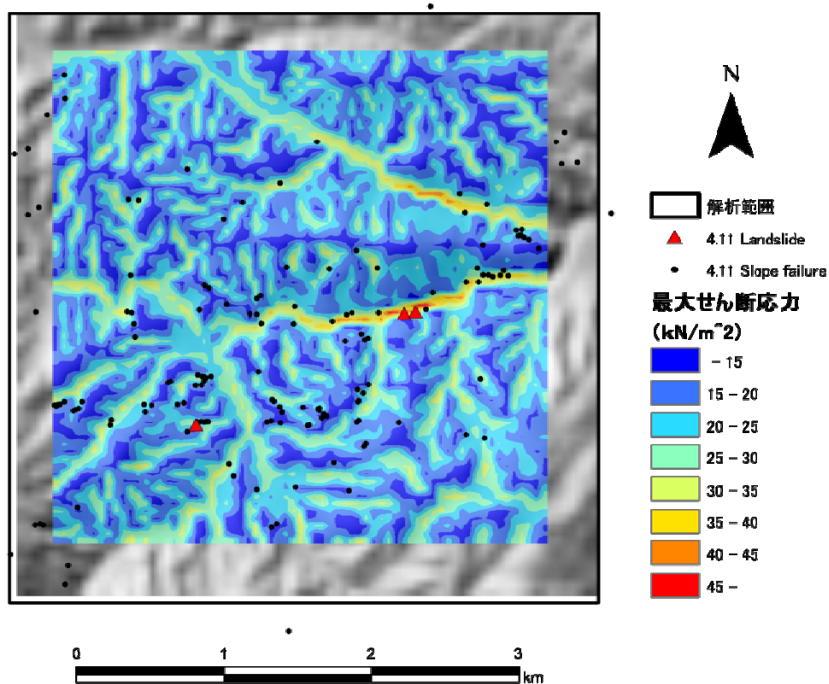


図-10(b) 地表面の最大せん断応力の分布（福島県いわき市南部）

査等の面的調査そしてサウンディング等の現地でのポイント調査で危険斜面を把握する手法について、主に東北地方太平洋沖地震での事例をもとに提案した。面的調査は、丘陵頂部斜面や上部谷壁斜面など後氷期の侵食の影響を免れ累積性の火山灰層が残存しやすい斜面を微地形分類で抽出し、空中電磁探査などで火山灰層が厚く被覆する可能性のある斜面を抽出する。その後、簡易貫入試験やハンドオーガー等で弱層となりやすい層の存在を確認して、危険斜面を抽出する手法を提案した。

(5) 斜面変動に及ぼす地震動の影響評価手法の検討

斜面変動発生にかかわる地震動の特性（例えば振幅や周波数，継続時間など）は，地震動が斜面に達するまでのさまざまな影響を受けている。すなわち，①震源における地震そのものの性質，②震源から地表までの伝播経路にある地殻の性質，さらに，③地表近くの複雑な地質・地形・地盤条件の相乗効果を受ける。また，巨大地震では，崩壊発生に影響しやすい短周期地震動が震源断層のどこでいつ発生するかも関係し，それらが重なり合う地域で影響が大きくなる可能性がある。ここでは，起震断層と斜面の位置関係からみた内陸直下型地震と海溝型地震の斜面変動発生への影響，斜面変動発生に影響する地震動特性の取りかた，地震波伝搬過程での表層物質が震動特性へ与える影響，地震規模と斜面変動発生数との関係からみた起こりうる斜面変動規模，などについて解説した。

（6）地震前降雨，融雪等影響について

地震発生に先行して降雨や融雪によって斜面内部に地下水が供給されていると，地震による斜面変動の発生のかたや発生数に変化が生じることがある。火山灰層被覆丘陵地では，地震により集水性の斜面地形でも崩壊が発生しやすくなる，流動化で土砂の移動距離が長くなる，などの影響が出やすい。また，地下水位が高まることで斜面安定度が低下するため，地震時の斜面変動発生数が増加したり，移動土砂が流動化し長距離移動しやすくなったりする。これらについて，1968年十勝沖地震，2004年中越地震，2008年岩手・宮城内陸地震と東北地方太平洋沖地震過去の事比較，などの事例をもとに解説した。

以上の研究成果をもとに，実務者向けの「地震時斜面変動発生危険地域調査要領案」を提案した。ここでは，広域評価の手法とその構築事例を中心に解説し，提案したAHP法を，各地域での地形・地質特性や過去の災害事例を考慮して適宜改良できるようにしている。また，危険箇所抽出に有用となる調査・解析手法及び視点についても記述した(図-11)。

目 次	
1. 概説	1
1.1 目的	1
1.2 地震による斜面変動の発生	1
1.3 適用範囲	2
1.4 構成	3
2. 広域危険度評価	6
2.1 危険度評価手法（AHP法）概説	6
2.2 資料収集と入力データの作成	9
2.3 各地域のAHPモデルとAHP得点の算出	12
2.4 AHP得点区分と危険度評価	19
3. 危険箇所抽出	20
3.1 地震応答解析	22
3.2 空中写真判読とLP地形図判読	28
3.3 火山灰被覆丘陵を対象とした崩壊性地すべりの恐れのある斜面の抽出方法	39
3.4 斜面変動に及ぼす地震動の影響評価指標の検討	44
3.5 現地調査における土木地質学的視点	50
3.6 地震に先行する降雨の影響	52
引用文献	
付属資料	

図-11 地震時斜面変動危険地域調査要領案の作成(目次)

⑥-4 AHP法を用いた地震による広域的な危険地域評価手法の特徴

地形・地質・地震動などのさまざまな素因・誘因が関わって発生する地震による斜面変動に対し、その発生危険個所評価を行う確実度の高い予測システムを作るには、統計的に十分な事例のある教師データだけでなく、不十分なデータでも歴史地震による過去の変動発生事例や経験による知見なども加えてデータを補強することが必要となる。AHP法は、問題解決のために経験値やまったく異なる手法で得たデータも含めて予測モデル構築に導入できる利点がある。また、要因間の一対比較という単純なウェイト評価が基本であるため評価の道筋がブラックボックスにならない点も特徴である。

本研究で開発した危険地域評価手法では、斜面変動の運動タイプに応じた主に地形・地質的な斜面安定に関わる要因を取り上げて組合せ評価に用いた。すなわち、過去の発生事例に基づく統計的データの解析と演繹的な推論や専門家の判断を組み合わせたAHP法での危険地域評価手法開発を行った。地震発生事例の多い新第三系以降の地質や火山灰層の被覆する丘陵地では、一般的に入手可能な地形図・数値地形データやデジタル地質図データから得られる地形・地質要因の組み合わせと配点によって地すべり・崩壊・崩壊性地すべり発生危険地域の抽出は可能になった。古第三系以前の地質でも、太平洋側の付加体を主とする山体重力変形の進行から大規模な崩壊性地すべりに至るような地域の抽出が可能となった。これは、早急な対策検討が迫られている南海トラフ地震での災害がとくに懸念される西南日本外帯の付加体地質の地域での地震による斜面変動災害の予測に大きく貢献すると期待される。

しかし、斜面の地形・地質的特徴や地質構造の発達には地域性があり、ここで示した地質地域・運動タイプごとの評価要因に加えて地域の地形・地質構造発達に起因するような要因を取り込むことが必要な場合がある。また、事例数が多くないことからこの研究では取り上げていない地質の地域（例えば深成岩など）では、AHP法を用いた新たな評価モデルを構築する必要がある。そこで、本研究の主要な成果であるAHP法による「地震時斜面変動発生危険地域調査要領」では、付属資料において手法開発の過程や検討の基礎となったデータなどについて解説を加えて、評価モデルの変更や新たなモデルの構築に供するようにしている。

⑦今後の課題・展望（本技術研究開発で得られた成果を踏まえ、成果のさらなる発展や砂防行政への活用に向けた、今後の課題・展望等を具体的に記載ください）

⑦-1 課題の概要

地震による斜面変動の発生には、誘因や素因として様々な要因が関係している。その中で地震動で重要とされるのは最大振幅と周波数特性、主要動の継続時間とされ、震源断層の破壊過程や複雑な構造の地表層での地震波の伝わり方や変質も影響を及ぼしている。斜面の形状や地質構造さらに破壊特性をも含む構成物質のバラエティーも考慮して、どこでどのような現象が発生するのかを予測するのは極めて難しい。さらに、過去の事例に見るように、斜面安定度を低下させる降雨や融雪の影響も考慮しておく必要がある。

また、古第三系以前の地質で内陸直下型として発生した2008年中国汶川地震での四川省を中心とした斜面災害多発事例では、大規模な崩壊性地すべりだけでなく極めて多数の崩壊も起こった。しかし、先カンブリア系など形成年代がきわめて古く、またドロマイトなど石灰質の硬質岩が発達する同地域では、上述した重力性山体変形斜面抽出を視点とした古第三系以前の地質地域でのAHP評価モデルでは、発生場を十分予測できてない。海外事例についてはKeefe(1984)やRodriguez et al(1999)などが地震によるランドスライド発生事例からインベントリーを構築し要因の整理を行っているが、そのような知見と我が国の事例について発生場の地質特性・地震動強さ、斜面変動運動タイプの比較などを行い、各国での地震による斜面災害軽減にも寄与できる評価手法へと発展させていくには国際的な共同研究などを進める必要がある。

次に、AHP法による評価手法を用いた危険地域評価結果の利用では、開発に用いたデータの大きさを考慮する必要がある。ここでは、主に空中写真判読による崩壊・地すべり発生場所のデータを用いた結果、面積 10^3 m^2 未満の小規模な現象の発生危険地域は予測できてない。同時に、AHP法構築では、GISによる解析単位(バッファー)の大きさが斜面変動の発生規模より多少大きい。したがって、危険度評価単位の大きさも同程度となる。このため、広域評価のためのAHP得点を、個別斜面単位で危険度評価に用いるのは適切でない。また、面積 10^3 m^2 未満の小規模な斜面変動の発生は予測の対象外である。

さらに、発生事例数が十分でないため AHP モデル検討を行っていない地質地域（例えば花崗岩類での崩壊・地すべり、先第三系の地すべりなど）や、ここで取り上げていない素因条件を入れるべき地域では、付属のマニュアル案に記載した手法に準じて評価要因の導入や配点を行うことが必要である。

⑦-2 地震動の取り扱いに関する今後の課題

本研究では、広域評価で地震動要因を考慮しておらず、震度 5 強以上の揺れが予想される場合に本評価手法の適用を想定している。そこで、地震動の取り扱いについて今後の課題を整理した。

1) 海溝型地震と内陸直下型地震

斜面変動に対する海溝型と内陸直下型の地震の影響の違いは、その影響範囲の広さであるが、震源断層全体の大きさに左右されるわけではない。海溝型の場合は、広大な震源断層のごく一部を占める短周期強震動発生域に注目すれば、海溝型と内陸直下型の断層の大きさにそれほど大きな違いはないと考えられる。海溝型では短周期強震動発生域が斜面変動発生域から離れているのに対して、内陸直下型では斜面変動発生域の直下にあるという違いがあるだけである。今後発生する南海トラフでの地震を考える際にも、このことを考慮すべきであろう。

2) 表層地盤での地震動の増幅と卓越周期の変化

地震動は表層地盤を伝播する間に、増幅（場合によっては減衰）したり、周期構造が変化する。対象とする斜面変動の規模（とくに深度）にもよるが、地表近くまで伝播した（表層地盤の影響を受けた）地震動を対象とした方がよいのか、表層地質の影響を受ける前の地震動を対象とした方がよいのか、適切に判断して地震動データを利用しなければならない。ちなみに、防災科研の KiK-net は地表と地中で地震動を記録している。

3) 入力地震動の性質と表層地盤の振動特性の関係

誘因としての地震動の性質だけではなく、素因としての表層地盤の振動特性も重要である。すなわち、表層地盤が入力地震動にあまり反応しないか、共振したように激しく反応するかは、斜面変動の発生原因として重要である。表層地盤の振動特性は、微動の H/V スペクトル比から求めることが多いが、表層の地形・地質や地盤の性質からその振動特性を類推できるように、事例を蓄積することが今後重要となる。

4) 地震加速度（地震力）と地震速度（地震エネルギー）

斜面変動の発生に関わるのは、地震加速度（地震力）か、地震速度（地震エネルギー）か。斜面変動の規模によって違いがあろうが、小規模な斜面変動には地震加速度（地震力）が、大規模な斜面変動には振動速度（地震エネルギー）が影響すると考えている。このことは、地震による斜面変動の発生メカニズムを考える上で重要であるため、事例の蓄積が望まれる。

5) 大きな上下動の影響

大規模斜面変動発生域近傍の地震動では、激しい上下動が記録されている例が多い。単なる振動としての取扱いではない取扱い方、例えば、防災科研のトランポリン効果（Aoi et al., 2008）や間隙水圧との関係などを考察することも必要であろう。

⑦-3 防災への活用に関する今後の課題

本成果の防災行政における活用方法としては、地震による地すべり・崩壊性地すべりの発生危険度の高い範囲の把握、地震による地すべり・崩壊性地すべりの発生危険度を考慮した土地利用規制等のソフト対策の検討、地震時の危険性を考慮したハード対策の優先順位の検討があげられる。しかしながら、一方で以下のような課題がある。

1) 危険度評価結果の精度

本成果は、土地利用規制等のソフト対策への活用、防災対策の優先順位付けへの活用が考えられるが、活用にあたっては危険度評価結果がどの程度の精度をもっているのかが重要となる。本研究では考慮していない地震動の大きさ等、個々の地震動特性、地震発生前の先行降雨の影響などが危険度に及ぼす要因の検討とあわせて評価結果の精度を検証していくことが重要と考えられる。

2) 異なる地質地域への本手法の適用性

今回事例解析を行った地域以外の異なる地域への適用性を検討することも重要である。解析で対象する地域が広がると精度が低下する恐れも考えられることから、解析対象地域の面積と評価結果の精度についても、あわせて検討していく必要がある。

3) 大縮尺地図でのゾーニング技術の開発

本研究では、5～10 万分の 1 スケールの発生危険度のゾーニング手法を開発したほか、一部 2.5～5 万分の 1 スケールのゾーニング手法の開発を行った。今後、より詳細なスケールでのゾーニング手法の開発を行い、より防災対策に活用な技術開発を進める必要がある。また、発生規模、移動到達範囲の設定手法について検討を行っていくことも重要である。

以上、述べた課題の解決のためには、今後、さらに新しい地震事例を追加して事例研究を進め、危険度評価手法の適用性を明らかにし評価手法の改良を行っていく必要がある。

参考文献

Aoi et al. (2008) : Trampoline Effect in Extreme Ground Motion, *Science*, 322, 727-730.

阿部真郎・林一成(2011) : 近年の大規模地震に伴う地震地すべりの運動形態と地形・地質的発生の場合、*日本地すべり学会雑誌*, 48(1), 52-61.

Keefer, D. K. (1984) : Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin* 95(4), 406-421.

Rodriguez, C. E., Bommer, J. J., Chandler, R. J. (1999) : Earthquake-induced landslides: 1980-1987. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18(5), 325-346.

Wakai, A. and Ugai, K. (2004) : A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, *Soils and Foundations*, 44(4), .83-97.